

LNG냉열이용 BOG 재액화공정 해석연구

윤상국* · 최형식*

New reliquefaction system of Boil-Off-Gas by LNG cold energy

S-K Yun* · H-S Choi*

Key words : BOG(기화 천연가스), Liquefaction system(액화공정), LNG cold energy(액화천연가스 냉열), Direct contact liquefaction method(직접접촉 액화방법), Indirect contact method(간접접촉 방법)

Abstract

The Boil-Off-Gases(BOG) in the LNG production terminal are continuously generated during the unloading, storage and supply processes by the heat penetration. In order to use these gases as useful fuel, the reliquefaction process should be installed to put the reliquefied BOG in the main LNG supply line before the secondary pump in terminal. The current reliquefaction method of BOG in LNG terminal is the direct contact one between LNG and BOG in the absorption column. But the system has severe disadvantage, which is the 10 times of LNG circulation needed for unit mass of BOG reliquefaction. It causes, therefore, high power consumption of LNG circulation pump and excessive city-gas supply, even if short demand of NG is needed in the summer time. In this paper, the new reliquefaction system of BOG by using LNG cold energy with indirect contact in precooler was suggested and analysed. The result showed new indirect contact method of BOG reliquefaction system between LNG cold energy and BOG is much more effective than the current direct contact one because of only about 1.3 times of LNG circulation needed and higher energy saving by pump power reduction.

기 호 설 명

C_p : 비열, kcal/kg $^{\circ}$ C
 h : 엔탈피, kcal/kg
 m : 질량유량, kg/h
 V : 체적유량, m 3 /h

하 첨 자

b : 기화 천연가스(BOG)
 i : 입구
 L : LNG액
 o : 출구

* 한국해양대학교 기계정보공학부

1. 서 론

1986년 수도권 지역에 청정연료인 천연가스의 공급이 시작된 이래, 2001년 현재 총 1,482km의 배관망이 건설되어 가스가 전국에 공급됨으로써 국민의 편의성 제공에 크게 기여하고 있다.⁽¹⁾ 이러한 천연가스의 공급 물량은 년 총 1,042만톤을 상회하며, 이에 따라 LNG 인수기지는 평택과 인천에 2곳이 운영되고 있고 세 번째 인수기지가 경남 통영에 건설되고 있다.⁽²⁾

LNG는 메탄을 주성분으로 하는 -162°C의 무색 무취의 액체로 압력이 75kg/cm²으로 상승된 후 해수에 의하여 0°C 가스로 변환되어 도시가스용으로 배관을 통하여 공급되고 있다. LNG의 가스화에 이용되는 해수는 LNG가 보유하고 있는 저온에너지와의 열교환에 의하여 온도 5°C정도가 저하되어 바다에 배출된다. 이 저온에너지를 냉열이라 하며 LNG의 기화와 더불어 막대한 에너지가 자연계에 버려지고 있다.

이 극저온 유체인 LNG는 인수기지의 하역, 저장 및 공급 과정 중에 외부로부터 열이 유입되어 계속적으로 기화된다. 이렇게 발생하는 천연가스 증기는 BOG (Boil-Off-Gas)라 불린다. 인수기지의 운영중 BOG 발생은 최대한 억제되어야 하며, 일단 발생한 가스는 유용하게 사용될 수 있도록 처리되어야 한다. 이 BOG는 대기의 압력과 동일한 상태로 발생되므로 이를 재 이용하기 위한 방법으로는 압력을 75kg/cm²으로 상승시켜 주 배관에 주입하거나, 재액화하는 방법이 있다. 고압으로 상승시키는 방법은 압축기의 동력소요가 매우 크고 압축시 과열로 인하여 잦은 기계적인 고장발생의 단점을 지니고 있다.

이러한 단점을 보완할 수 있는 방법의 하나는 현재 국내 공급기지에서 적용하고 있는 직접접촉 재액화방법이다. 그러나 이 방법은 탱크내부에 저장 중인 LNG를 다량 순환시켜야 하므로 순환되는 LNG량 전부를 소비하는 수요처가 있어야 하고, 순환중 일부가 기화되며 동력이 크게 소요되는 단점이 있다. 특히 하절기에는 도시가스 수요의 감소로 LNG 순환량이 부족하게 되는 문제를 지니고 있다.

본 연구는 이러한 기존 BOG 재액화공정의 문제점

해결과 자연계에 버려지는 LNG의 보유냉열을 유용하게 활용하고자 하는 것으로, 새로운 액화공정을 제안하고 시스템의 열해석과 공정 운전 인자들의 영향을 분석하여 제안된 공정의 성능을 해석하였다.

2. 기존 BOG 처리 공정

현재 LNG탱크 10기를 가동 중에 있는 평택 인수기지의 발생 BOG량은 정상운전 중에는 32,580 Nm³/hr (시간당 LNG 26톤)이고 LNG운반선으로부터 LNG를 하역할 때는 37,380Nm³/hr의 BOG가 추가로 발생하여 총 BOG 이론 발생량은 69,960Nm³/hr(시간당 LNG 56톤)가 된다.⁽³⁾ 이는 대기압 상태로 압력이 낮아 가정에 공급하기에 부적합한 형태의 BOG로써 재액화 처리 공정을 거쳐야 한다.

국내외 공급기지에서 적용되고 있는 BOG 처리 방법은 가스 압력을 압축기로 상승시킨 후 동일 압력의 LNG를 주입하여 발생된 가스와 직접 접촉시

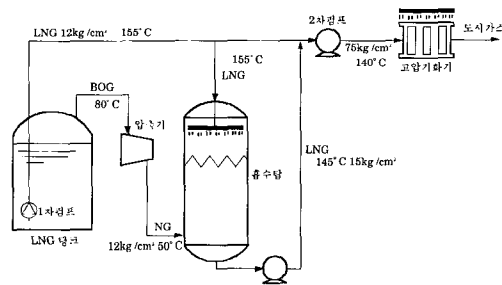


Fig. 1 Direct contact BOG liquefaction system.

Table 1 Main specification of direct contact BOG absorption system(1)

Main equipment	Specification
Absorption tower	- Type : direct contact packing
	- Capacity : 60T/h
Absorption tower	- Diameter : 3.6m
	- Height : 20m
	- Design pressure : 19.3kg/cm2g
	- Design temperature : -170 °C
- Material : SUS304L	

켜 재 액화하는 방법으로 Fig. 1과 같다.³⁾ 이 공정을 보면 LNG 저장탱크에서 발생한 -80℃의 기화된 BOG를 압축기로 12kg/cm² 까지 승압시켜 액화점 온도를 -122℃로 상승시킨 후 흡수탑에 주입한다. BOG의 온도는 압축기의 압축과정중에 약 50℃로 상승하게 된다. 한편 LNG 저장탱크에 저장중인 과냉각 용액상태인 -155℃의 LNG는 1차펌프를 사용하여 12kg/cm² 압력으로 흡수탑에 주입된다. 흡수탑내에서 BOG는 LNG와 열전달에 의하여 흡수, 액화된다. 액화된 BOG는 반송펌프에 의해 15kg/cm²로 승압되어 2차펌프 입구측에 주입된다.

이 직접접촉 액화법은 대규모의 흡수탑과 함께 액화된 BOG순환과 LNG의 순환을 위한 추가동력을 필요로 하게 되며 이의 사양을 Table 1에 나타내었다. 또한 BOG 발생량의 액화를 위하여 이론적으로는 7배의 LNG를 순환시켜야 하나 순환중 BOG의 추가 발생과 완전액화를 위하여 실제 운전은 10배 즉 BOG 30톤에 대하여 300톤의 LNG 순환을 필요로 한다. 이와 같이 BOG양에 따라 LNG 순환이 크게 늘어나므로 하절기에는 도시가스의 수요가 감소되어 LNG 순환량이 부족하게 되어 BOG의 안정적 처리에 어려움을 내포하고 있다.

3. 제안된 간접접촉 액화공정

3.1 공정 구성

본 개발 공정은 발생된 BOG를 기존의 BOG압

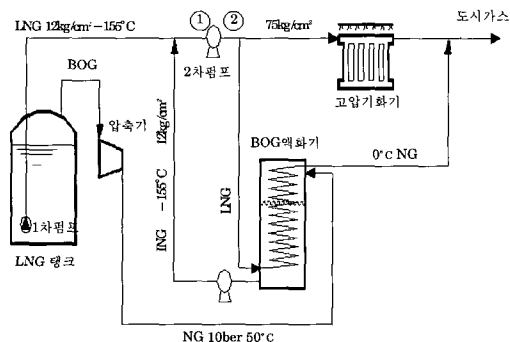


Fig. 2 New indirect contact BOG reliquefaction system by LNG cold energy.

축기로 가압한 후, 고압용 2차 펌프에서 승압된 LNG와 열교환을 시키는 냉열이용 간접접촉 열교환 방식으로 Fig. 2와 같다. 액화에 필요한 냉열은 고압 2차펌프를 거쳐 고압기화기에 주입되기 전, 온도 -155℃, 압력 75kg/cm² 인 과냉상태인 LNG가 보유한 상변화 잠열과 현열로부터 공급되며, 냉열을 제공한 LNG는 기화후 0℃의 가스상태로 고압기화기 후단에 주입된다. 액화되는 BOG의 성분은 94~96%가 비점이 낮은 메탄으로 액화점은 12kg/cm²에서 -122℃이며 이를 -135℃까지 과냉각시킨다. 액화된 BOG는 반송펌프를 이용하여 15kg/cm²로 승압하여 LNG 고압 2차펌프 입구측 즉 Fig. 2의 지점 ①에 주입한다. 이는 저장탱크에서 공급되는 LNG와 같이 혼합된 후 2차펌프에서 75kg/cm²의 고압으로 상승된 후, 기존의 고압기화기에서 기체화되어 도시가스용으로 공급된다. 이때 고압기화기 운전이 문제 없도록 고압기화기 입구측 즉 Fig. 2의 지점 ②의 온도는 -140℃이상으로 유지되어야 한다.

3.2 에너지 수지

BOG 발생량에 대한 액화 부하열량을 산정하여 필요한 LNG량을 얻는다. 에너지 수지 관계식은

$$Q = m_{bog} (h_2 - h_1) = V_{bog} \rho (h_2 - h_1) = m_{LNG} (h_4 - h_3) \quad (1)$$

이 된다. 여기서 ρ는 0℃, 1atm에서 BOG의 밀도로 0.705kg/Nm³ 이다. 발생 BOG의 변동에 따른 개발 공정의 정상상태에서 각 지점의 상태와 발생된 BOG의 액화 후 LNG와 혼합하여 공급하기 위한 고압기화기 입구측의 온도는 액상의 혼합으로 다음 식에서 산정된다.

$$m_o h_o = m_{im} h_{im} + m_{ib} h_{ib} \quad (2)$$

$$m_o C p_o T_o = m_{im} C p_{im} T_{im} + m_{ib} C p_{ib} T_{ib} \quad (3)$$

4. 간접접촉 액화공정과 기존 BOG 처리 공정의 성능비교

기존 BOG 액화공정과 제안된 간접접촉 액화공정의 성능비교를 다음의 BOG발생량과 이의 처리를 위한 LNG냉열 소요량 및 이들의 에너지 소모의 관점에서 행하였다.

4.1 BOG 발생량과 LNG냉열 소요량

Fig. 3은 -162°C 에서 0°C 까지의 LNG가 압력에 따라 보유하고 있는 냉열량을 나타낸다. 그림에 나타난 바와 같이 냉열량은 현열부와 잠열부로 이루어져 있으며, $75\text{kg}/\text{cm}^2$ 고압 LNG의 냉열량은 현열량 $127\text{kcal}/\text{kg}$ 와 잠열량 $43\text{kcal}/\text{kg}$ 이 혼합되어 $170\text{kcal}/\text{kg}$ 이 되고, $12\text{kg}/\text{cm}^2$ 저압 LNG는 $196\text{kcal}/\text{kg}$ 으로 고압의 LNG냉열 보유량이 저압보다 적게 된다. 그러므로 Fig. 2의 간접접촉 액화공정에서 사용하는 2차 펌프후의 고압LNG는 저압LNG보다 잠열부는 적으나 과냉각된 현열부가 큰 냉열을 보유하게 된다.

BOG발생량의 액화에 필요한 LNG 냉열량을 Fig. 4에 나타내었다. 대표적 BOG액화 부하량인 LNG운반선에서 LNG를 하역할 때의 발생량 즉 시간당 최대 $69,960\text{Nm}^3$ (LNG 56톤)를 기준으로 하여 LNG 순환 냉열량은 그림에서 BOG량의 약 1.3배인 $1.18 \times 10^7\text{kcal}/\text{hr}$ 즉 72.3톤이 필요하게 된다. 이는 식 (1)의 두 유체의 열교환에너지, 즉 엔탈피 차에 의한 것이다.

이를 보면 BOG 단위 질량당 액화에 필요한 에너지량은 BOG 액화온도인 $12\text{kg}/\text{cm}^2$, -135°C 의 엔탈피값에서 압축기 배출압력 $12\text{kg}/\text{cm}^2$, 온도 50°C 의 엔탈피 차로 $205\text{kcal}/\text{kg}$ 이 된다. LNG 단위 질량당 냉열 제공량은 LNG 과냉각액의 $75\text{kg}/\text{cm}^2$, -155°C 상태의 엔탈피 값에서 천연가스 0°C 까지의 엔탈피차인 $159\text{kcal}/\text{kg}$ 이다. 이 72.3톤의 LNG순환량은 최저부하인 하절기 공급기지의 시간당 LNG 송출량 300톤의 24.1%로 이량이 보유하고 있는 저온 에너지만을 회수하여 활용하게 되므로 원활한 기지의 운전을 기대할 수 있게 된다. LNG순환량은 BOG발생이 80톤인 경우에도 하절기 LNG 공급량의 1/3정도이므로 전혀 영향을 미치지 않음을 알 수 있다.

Fig. 5는 열교환 효율을 고려했을 때의 간접접촉식의 냉열소요량을 보여준다. 이는 LNG냉열과 열교환하여 BOG를 액화하는 액화기의 열교환 효율에 따른 냉열 소요열량과 LNG량을 나타낸 것이다. 그림에서 보면 시간당 BOG 80톤에 대하여 열교환 효율이 100%일 때 LNG순환량은 103톤이나 효율 80% 경우 128톤으로 상승한다. LNG냉열 열교환기의 통상 효율은 80~85% 정도이므로 본 공정의 운전에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 즉 효율이 낮은 80%의 경우도 BOG발생이 56톤에 대하여 LNG순환량은 100톤 만이 소요된다.

직접접촉식의 경우는 두 유체의 혼합에 의한 열교환으로 효율이 100%에 가까우나 전술한 바와 같이 LNG의 과냉각 에너지만을 이용하기 때문에 간

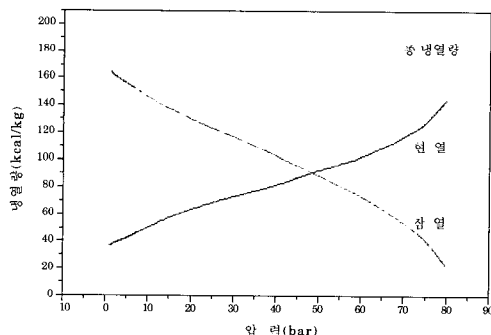


Fig. 3 Latent and sensible heats of LNG cold energy.

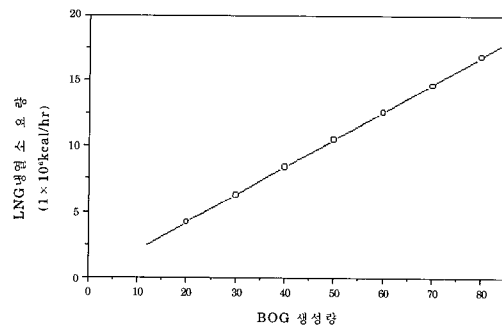


Fig. 4 LNG cold energy demand for BOG reliquefaction.

접촉식 보다 많은 양의 LNG가 필요하게 된다.

4.2 BOG발생량의 변화에 따른 LNG공급 영향

고압기화기 입구에서 일부 LNG의 기화로 험머링 등의 문제가 발생되지 않도록 고압기화기 전 즉 Fig. 2의 지점 ②의 온도를 -140°C 이하로 유지하여야 하며, 이의 판단을 위하여 액화된 BOG량의 변동에 따른 고압기화기 입구측의 온도 변화를 Fig. 6에 나타내었다. 저장탱크에서 공급되는 LNG는 -155°C 의 과냉각 상태로 액화된 BOG 즉 -135°C 의 온도가 높은 액체가 혼합될 때 온도가 일부 상승하게 된다. Fig. 6에서 하절기 최저 도시가스의 공급량인 시간당 300톤을 기준하고 BOG 발생량을 시간당 60톤이라면, -155°C 의 주 LNG 240톤에 -135°C 의 액화 BOG 60톤이 혼합되어 Fig. 2 지점 ①의 온도는 -149°C 가 되므로 고압펌프에서 5°C 가 상승하여 기화기 전 즉 지점 ②의 온도는 -144°C 가 된다. 그러므로 본 액화공정은 기화기입구의 LNG가 과냉각 상태를 유지하게 되므로 운전 전 영향 미치지 않는다. 또한 LNG의 온도의 일부 상승은 고압기화기에서의 열교환 부하를 낮추는 효과와 해수의 온도 저하를 막아 환경유지에 도움을 주는 효과를 갖는다.

한편 BOG액화를 위하여 냉열을 제공하고 기화된 LNG의 시스템 영향을 보면, BOG액화를 위하여 필요한 시간당 128톤의 LNG는 주저장 탱크의 1차펌프에 의하여 송출되어 액화기에서 열교환 후 기화기 후단에 주입된 LNG와, 주 탱크에서 발생

된 BOG 80톤은 액화되어 2차펌프와 고압기화기를 거쳐 혼합되어 총 208톤의 LNG가 공급되므로 하절기 최저 공급량보다 적게 된다.

4.3 기존방식과 에너지 소요비교

방법별 에너지 소요를 비교하여 보면, 본 간접접촉 냉열이용 방식은 시간당 30톤의 BOG 액화를 위해서 39톤의 고압 LNG 순환만을 필요로 하는 반면, 현재의 LNG직접접촉 방식은 7배인 210톤의 LNG순환이 이론적으로 요구되고 있고 실제로 열손실 등에 의해 10배의 LNG가 순환되고 있다. 이로 인하여 흡수탑에서 액화된 BOG와 LNG를 2차펌프 전에 주입하기 위한 LNG 재순환 펌프의 동력이 크게 소요된다. 이 펌프의 용량은 시간당 930톤을 송출하는 데 소요동력은 600kW로 송출량 300톤을 기준할 때 본 공정을 적용하여 연간 절감되는 펌프 동력을 보면 약 $1.5 \times 10^6 \text{kWh}$ 가 되며 이를 절감액으로 환산하면 연간 0.9억원이 된다. 또한 LNG냉열 이용량을 보면, 시간당 LNG 40톤을 기준하여 연간 5,571억kcal가 된다. 즉 본 개발공정은 순환동력의 절감뿐만 아니라 하절기 천연가스 수요의 감소에 대처할 수 있으므로 인수기지 운전의 안정성과 경제성을 제공하는 효과적인 처리 공정으로 판단된다.

5.1 기존 BOG 처리공정의 민감도 해석

기존 BOG 처리공정은 Fig. 1에 나타나 있고 이를 유량에 따라 신호선도로 표현하면 Fig. 7과 같

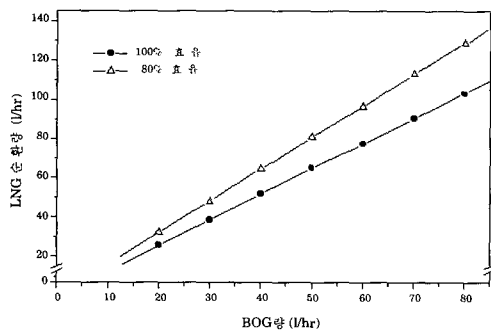


Fig. 5 LNG circulation flow rate for BOG reliquefaction.

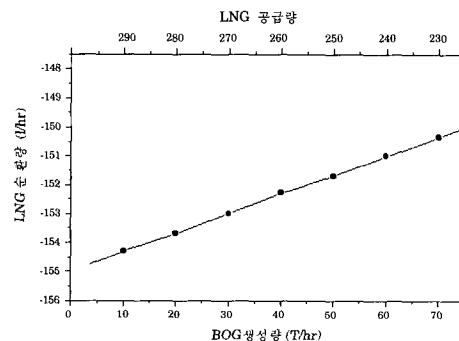


Fig. 6 Inlet temperature variation of open rack vaporizer with liquefied BOG amount.

이 표현할 수 있다. Fig. 7에서 과는 각각 저장 탱크에서 공급되는 도시가스 유량과 BOG 유량이다. 또한, 는 BOG 가스를 액화하기 위하여 유입하는 의 일정량이며 는 이들 간의 비율이다. 관계식을 살펴보면 다음과 같다.

$$G_4 G_1 = a_1 G_2 \quad (4)$$

따라서,

$$G_4 = \frac{a_1 G_2}{G_1} \quad (5)$$

민감도 해석을 위하여 입력인 및 BOG와 도시가스 공급량 사이의 경로 함수를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_1 &= G_1 G_3 \\ P_2 &= G_1 G_4 \\ P_3 &= G_2 \end{aligned} \quad (6)$$

도시가스 공급량은

$$\begin{aligned} C^T &= (G_1 G_3 + G_1 G_4) + G_2 \\ &= (G_1 G_3 + a_1 G_2) + G_2 \\ &= G_1 G_3 + (a_1 + 1) G_2 \end{aligned} \quad (7)$$

이 시스템의 BOG 변화량에 대한 C^T 의 민감도는 정의에 따라 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \int_{G_2} C^T &= \frac{\partial C^T}{\partial G_2} \frac{G_2}{C^T} \\ &= \frac{(a_1 + 1) G_2}{G_1 G_3 + (a_1 + 1) G_2} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 $G_1 G_3$ 는 G_2 의 변화량에 무관하고 도시가스 공급량에만 영향을 미친다. 민감도 식 (8)에서의 $G_1 G_3$ 의 $(a_1 + 1) G_2$ 에 대한 상대적 크기에 따라 민감도가 결정된다.

5.2 제안된 간접접촉 액화공정의 민감도 해석

제안된 간접접촉 액화공정은 Fig. 2에 나타나 있고 이를 유량에 따라 신호선도로 표현하면 Fig. 8과 같이 표현할 수 있다.

Fig. 7에서와 같이 Fig. 8에서도 G_1 과 G_2 는 각각 저장 탱크에서 공급되는 도시가스 유량과 BOG 유량이다. G_4 는 간접접촉으로 LNG냉열과 열교환하여 BOG 가스를 액화하기 위하여 유입하는 $G_1 + G_2$ 의 비율이며 a_2 는 이들 간의 비율이다. 관계식을 살펴보면 다음과 같다.

$$G_4 (G_1 + G_2) = a_2 G_2 \quad (9)$$

$$G_4 = \frac{a_2 G_2}{G_1 + G_2} \quad (10)$$

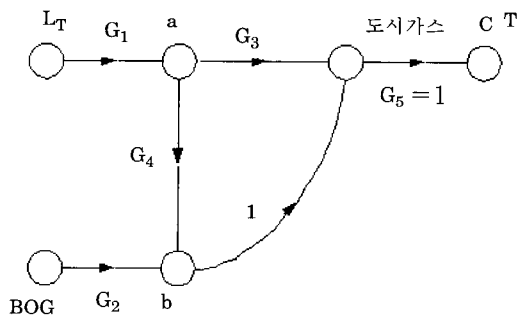


Fig 7. Transfer function flow diagram of present BOG process.

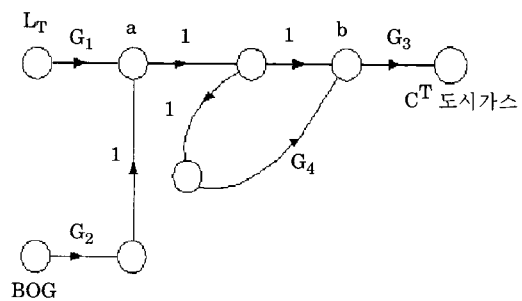


Fig 8. Transfer function flow diagram of indirect contact BOG reliquefaction process.

같은 방법으로 L_T 및 BOG와 도시가스 공급량 C^r 사이의 경로 함수를 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_1 &= G_1 G_3 \\ P_2 &= G_1 G_4 = \frac{a_2 G_1 G_3}{G_1 + G_2} \\ P_3 &= G_2 G_3 \\ P_4 &= G_1 G_4 = \frac{a_2 G_2^2}{G_1 + G_2} \end{aligned} \quad (11)$$

도시가스 공급량은

$$\begin{aligned} C^r &= P_1 + P_2 + P_3 + P_4 \\ &= (G_1 + G_2) G_3 + \frac{a_2 G_2 (G_1 + G_2)}{G_1 + G_2} \\ &= G_1 G_3 + (G_3 + a_2) G_2 \end{aligned} \quad (12) 261$$

이고, 이의 G_2 의 변화에 대한 영향은 다음의 민감도 해석으로 판별할 수 있다. 민감도는 정의에 따라 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \int_{G_2}^{C^r} &= \frac{\partial C^r}{\partial G_2} \frac{G_2}{C^r} \\ &= (G_3 + a_2) \frac{G_2}{G_1 G_3 + (G_3 + a_2) G_2} \\ &= \frac{(G_3 + a_2) G_2}{G_1 G_3 + (G_3 + a_2) G_2} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서도 기존 BOG 처리공정의 민감도 식과 같이 $G_1 G_3$ 는 G_2 의 변화량에 무관하고 도시가스 공급량에만 영향을 미치며, 민감도 식 (13)에서 $(G_3 + a_2) G_2$ 에 대한 상대적 크기에 따라 민감도가 결정된다.

5.3 제안된 간접접촉 액화공정과 기존BOG 처리 공정의 민감도 비교 및 고찰

제안된 간접접촉 액화공정과 기존 BOG 처리 공정의 민감도의 결과가 식 (8)과 (13)에 각각 나타나 있다. 민감도는 크기가 작을수록 변화인자의 영향을 적게 받으므로 작은 것이 더 좋다. 따라서 민감도 결과에서 각각의 $G_1 G_3$ 의 유량에 대하여 $(a_1 + 1)$ 와 $(G_3 + a_2)$ 중에서 비율이 작은 쪽이 상대적으로 민감도가 작다. 각 공정의 상대적 민감도

비율을 식으로 표현하면 식(14)와 같다.

$$\begin{aligned} \Gamma &= \frac{\text{간접 액화공정 민감도}}{\text{기존 BOG 처리공정 민감도}} \\ &= \frac{(G_3 + a_2) G_2}{G_1 G_3 + (G_3 + a_2) G_2} / \frac{(a_1 + 1) G_2}{G_1 G_3 + (a_1 + 1) G_2} \\ &= \frac{G_3 + a_2}{a_1 + 1} \end{aligned} \quad (14)$$

민감도의 정량적 비교를 위하여 각 공정에서 BOG 가스를 액화하기 위하여 유입하는 BOG양 대 유입유량의 비를 살펴보면, $a_1 = 10$ 이고 $a_2 = 1.3$ 이다. 또한, 고압기화기로 직접 유입되는 유량은 일정량의 도시가스 공급량에서 BOG 가스를 액화하기 위하여 유입되는 G_1 에서 G_2 를 제한 양이므로 액화용 G_2 의 양이 많으면 이의 양은 상대적으로 줄어든다. 각 경우의 비교를 위해서 적당한 값을 선정하여 구한 민감도 식에 대입하면 각 공정에 대한 민감도를 알 수 있다. 공정의 환경 및 조건이 다음과 같이 설정되었다고 하자.

도시가스 공급량 : 300 톤/h
BOG 발생량 : 20 톤/h

이에 따라 각각의 경우의 민감도를 계산하면 다음과 같다.

ㄱ. 기존 BOG 처리공정

$$\begin{aligned} \int_{G_2}^{C^r} &= \frac{(a_1 + 1) G_2}{G_1 G_3 + (a_1 + 1) G_2} \\ &= \frac{11 \times 20}{100 + 11 \times 20} = 0.69 \end{aligned}$$

여기서

$$G_3 = 1 - G_4 = 1 - a_1 \frac{G_2}{G_1} = \frac{1}{3}$$

ㄴ. 간접 접촉 액화공정

$$\begin{aligned} \int_{G_2}^{C^r} &= \frac{(G_3 + a_2) G_2}{G_1 G_3 + (G_3 + a_2) G_2} \\ &= \frac{2.3 \times 20}{274 + 2.3 \times 20} = 0.14 \end{aligned}$$

$$\text{여기서 } G_3 = 1 - \frac{a_2 G_2}{G_1 + G_2} = 0.913$$

각 경우를 비교한 결과를 보면 BOG 발생량의 변화에 대한 도시가스 공급량에 미치는 영향에 있어서 제안된 간접접촉 액화공정이 기존 BOG 처리공정에 비하여 민감도 비가 5배 적은 강건한 공정임을 알 수 있다.

6. 결 론

자연계에 방출되는 LNG의 보유냉열을 이용하여 LNG인수기지의 저장이나 하역 중에 발생하는 BOG를 처리하는 새로운 액화공정을 제안하고 그 공정의 성능을 해석하였다. 기존 공정과의 성능비교를 통하여 제안된 공정은 다음과 같은 기술적 경제적 우수성을 갖는다.

1. BOG의 액화에 필요한 LNG순환량은 현 공정에 비교할 때 18%에 불과하고, 이 것은 하절기 인수기지의 시간당 LNG 송출량의 감소에 기여하여 안정된 운전 공정이 된다.
2. 제안된 간접접촉 공정의 냉열이용은 기존의 LNG직접접촉 액화방법에 비해 약 85%의 펌프 동력이 절감된다.
3. 제안된 간접접촉 액화공정은 기존 BOG 처리공정에 비하여 민감도 비가 약 5배 적은 강건한 공정이다.
4. 간접접촉 공정이 현재의 재액화 공정의 문제점을 개선하고 대체할 수 있는 효율적인 공정으로 분석되었다.

후 기

이 논문은 2001년도 두뇌한국21사업에 의하여 지원되었습니다.

참 고 문 헌

1. 가스생산기술수첩 REV. 1, 1997, 한국가스공사, pp. 65-132.
2. 천연가스 수요패턴분석 자료집, 1998, 한국가스공사.
3. TEI, 1995, Technical note, Rev. 1, pp. 1-5.
4. 기술검토서(인수기지 및 주배관로), 1993, 한국가스공사.

저 자 소 개



윤상국(尹相國)

1955년생. 1997년 성균관대학교 화학공학과 졸업. 1982년 연세대학원 화학공학과 졸업 (공학석사). 1989년 영국 사우드햄프턴대학교 초저온공학과 졸업 (공학박사). 현재 한국해양대학교 기계정보공학부 냉동공조 에너지 전공 부교수.



최형식(崔炯植)

1961년생. 1983년 고려대학교 기계공학과 졸업. 1989년 University of South Carolina (공학석사). 1993년 North Carolina State University (공학박사). 현재 한국해양대 기계정보공학부 부교수.